doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2026. 09. 003

宜昌白果园银钒矿工艺矿物学研究

池汝安[1,2],覃哲昊[3],郭文达[1,2],刘德峰[1],余　洪[1],陈　卓[1],徐　彪[4],刘　鑫[2]

(1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院,武汉 430073;
2. 湖北兴发化工集团股份有限公司,湖北 宜昌 443799;
3. 武汉工程大学 化学与环境工程学院,武汉 430205;
4. 武钢中冶工业技术服务有限公司集团,武汉 430080)

摘　要: 为阐明湖北省宜昌白果园银钒矿的矿物学特征,揭示银、钒有价元素的赋存规律,本文采用AMICS、BPMA矿物自动定量分析系统,结合扫描电子显微镜-能谱仪(SEM-EDS)、X射线衍射(XRD)、X射线荧光光谱(XRF)等多种检测手段,系统开展矿石化学组成、矿物组成、矿物嵌布特征及银-钒赋存状态研究。结果表明,白果园银钒矿原矿V_2O_5品位1. 16%,Ag_2O品位0. 01%,属于低品位银钒共伴生矿石;矿石风化程度较高,矿物多以不等粒颗粒集合体形式产出;主要金属矿物为磁铁矿、赤铁矿,含少量黄铁矿;非金属矿物以白云石为主,其次为钾长石、石英,另有少量方解石、磷灰石、高岭石等。钒主要富集于钾长石矿物中,结合微区测试结果推测钒大概率以类质同象进入钾长石晶格,同时钾长石内部包裹的微米级钒钛磁铁矿、黑云母包裹体中同样检测出钒元素;银主要赋存于黄铁矿中。含钒钾长石常与白云石、磁铁矿、赤铁矿、石英等矿物紧密连生;含银黄铁矿多与白云石、钾长石、石英、磁铁矿连生,仅少量颗粒呈单体解离状态。本研究可为该银钒矿后续选冶试验开发提供工艺矿物学基础依据。

关键词: 白果园;银钒矿;赋存状态;工艺矿物学

中图分类号: TD91;TD952　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-9492(2026)09-0027-10

Study on Process Mineralogy and Occurence Characteristics of Silver-Vanadium Ore in Baiguoyuan, Yichang

Chi Ru′an[1,2], Qin Zhehao[3], Guo Wenda[1,2], Liu Defeng[1],
Yu Hong[1], Chen Zhuo[1], Xu Biao[4], Liu Xin[2]

(1. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;
2. Hubei Xingfa Chemical Group Joint Stock Company, Yichang 443799, Hubei, China;
3. School of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
4. Wugang MCC Industrial Technology Service Co. , Ltd. Group, Wuhan 430080, China)

Abstract: In order to clarify the mineralogical characteristics of Baiguoyuan silver-vanadium ore in Yichang, Hubei Province and reveal the occurrence rule of valuable silver and vanadium elements, automatic mineral quantitative analysis systems (AMICS and BPMA), combined with scanning electron microscope-energy dispersive spectrometer (SEM-EDS), X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence spectrometer (XRF), were adopted to investigate chemical components, mineral assemblages, mineral embedding characteristics and element occurrence of silver-vanadium ore. The results show that the raw ore is low-grade associated silver-vanadium ore with V_2O_5 grade of 1. 16% and Ag_2O grade of 0. 01%. The ore suffers intensive weathering, and minerals mostly aggregate as granular assemblages with variable particle sizes. The main metallic minerals are magnetite and hematite, with minor pyrite. Non-metallic minerals are dominated by dolomite, followed by potassium feldspar and quartz, together with small amounts of calcite, apatite and kaolinite. Vanadium is mainly concentrated in potassium feldspar. According to

收稿日期: 2025-03-06
基金项目: 湖北省自然科学基金联合基金项目(2024AFD175);湖北省自然科学基金创新群体项目(2023AFA044);武汉工程大学校内科学研究基金项目(K2021101)
作者简介: 池汝安(1959—),男,福建宁华人,博士,教授,博士生导师,主要从事矿物加工理论与技术研究。
通信作者: 刘德峰(1988—),男,安徽淮北人,博士,特聘教授,主要从事矿产资源绿色开发利用等方面的研究。

micro-area test results, vanadium is likely incorporated into the crystal lattice of potassium feldspar via isomorphism. Vanadium is also detected in micro-grained vanadium-titanium magnetite and biotite inclusions encapsulated within potassium feldspar. Silver is primarily hosted in pyrite. Vanadium-bearing potassium feldspar is closely intergrown with dolomite, magnetite, hematite and quartz. Silver-bearing pyrite is mostly intergrown with dolomite, potassium feldspar, quartz and magnetite, and only a small proportion occurs as liberated monomers. This work can provide mineralogical reference for the subsequent beneficiation-metallurgy tests of this silver-vanadium ore resource.

Key words: Baiguoyuan; silver-vanadium ore; occurrence state; process mineralogy

银既是具备保值抗通胀属性的贵金属，也是导电性能优异的功能金属材料，在光伏、半导体等新兴产业中不可或缺，对我国科技发展、能源转型以及资源安全保障具有重要作用[1-2]。钒既是特种钢材的重要合金添加剂，也是钒液流储能电池的核心原料，在新能源领域具备广阔应用前景[3]。

湖北宜昌白果园银钒矿属于典型黑色页岩型共伴生银钒矿床，尚未实现规模化开发利用；已探明矿石储量639万t，伴生金属银1 700 t，伴生V_2O_5储量18.5万t[4-5]，具备较高的研究价值。该矿床矿石风化强烈，矿物构造复杂，银、钒整体品位偏低，给工艺矿物学精细解析带来较大困难。

前人已采用偏光显微镜、电子探针等手段开展该矿床矿物学研究[6-7]。李方会等[8]认为银主要以微米级包裹体赋存于黄铁矿，钒主要赋存于云母类矿物；李捷[9]提出银主要以硫化银形式产出，部分赋存于黄铁矿、石英等硅酸盐矿物，钒主要赋存在云母类矿物中。可见，已有研究对于钒的主要载体矿物存在认识分歧；同时传统显微分析手段对低含量元素的微观赋存特征解析能力有限[10-11]。

基于上述问题，本文引入AMICS、BPMA两套矿物自动定量分析系统，联合SEM-EDS、XRD、XRF多种微区测试技术[12-17]，系统查明该矿石化学组成、矿物组成、粒度及嵌布共生关系，解析银、钒的赋存特征，为后续选冶工艺研发提供矿物学支撑。

1 试样制备与测试分析方法

1.1 试样制备

试验矿样采自湖北省宜昌市兴山县白果园银钒矿。原矿经破碎、磨矿后得到－150 μm(100目)磨矿产品，主要用于试样化学成分、物相组成、矿物共生及解离特征测试分析。为消除微细颗粒表面黏附效应对银、钒微区测试的干扰，将－150 μm样品进行筛分，选取－150＋75 μm(－100＋200目)粗粒级矿样；通过多次水洗除去颗粒表面黏附的微细粉尘，得到粗粒水洗样品，专门用于银、钒元素赋存状态检测。

1.2 测试分析方法

1.2.1 X射线衍射物相分析

X射线衍射(XRD)是识别矿石物相组成的常用测试手段[18]。本次测试采用帕纳科EMPYREAN型X射线衍射仪，铜靶作为X射线光源；测试条件：管电压40 kV，管电流40 mA，扫描角度5°～75°，连续扫描模式，步长0.033°，扫描速率8°/min。

1.2.2 矿物自动定量分析

矿物自动定量分别采用澳大利亚Yingsheng Technology开发的AMICS系统，以及矿冶科技集团有限公司自主研发的BPMA工艺矿物学自动分析系统[19-20]。两套系统均以扫描电镜-能谱仪为硬件基础，结合图像识别与能谱解析，实现矿物自动识别、矿物含量、嵌布粒度、解离度等工艺矿物学参数自动统计。其中AMICS测试在湖北省地质实验测试中心完成，BPMA测试在东北大学资源与土木工程学院完成；两套设备统一测试条件：加速电压20 kV，束流强度5 nA，工作距离10 mm。

2 银钒矿试样分析

2.1 试样主要化学成分分析

采用X射线荧光光谱仪(XRF)对银钒矿原矿试样进行化学多元素分析，分析结果见表1。由表1可知，原矿主要化学组成为SiO_2、CaO、Al_2O_3、Fe_2O_3、

表1 试样主要化学成分分析结果

Table 1 Results of chemical composition analysis of the ore sample /%

组分	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	BaO	V_2O_5
含量	39.87	20.49	11.51	8.01	7.76	6.07	2.38	1.16
组分	TiO_2	P_2O_5	SO_3	Cr_2O_3	Na_2O	CuO	MnO	Ag_2O
含量	0.76	0.53	0.44	0.33	0.19	0.11	0.11	0.01

MgO、K_2O；其含量分别为 39.87%、20.49%、11.51%、8.01%、7.76%、6.07%。试样中目标有价组分品位偏低，V_2O_5为 1.16%，Ag_2O仅 0.01%，属于典型低品位银-钒共伴生矿石。

2.2　试样矿物组成分析

2.2.1　试样 XRD 分析

银钒矿试样 XRD 分析结果见图 1。由图 1 可知，银钒矿矿物组成相对比较简单，主要矿物组成为白云石、钾长石、石英，该结果与 XRF 化学组分分析中高 SiO_2、CaO、Al_2O_3的特征相互印证。试样中磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿等金属矿物在 XRD 图谱中未出现明显特征衍射峰，主要原因是金属矿物整体含量较低，衍射信号较弱。

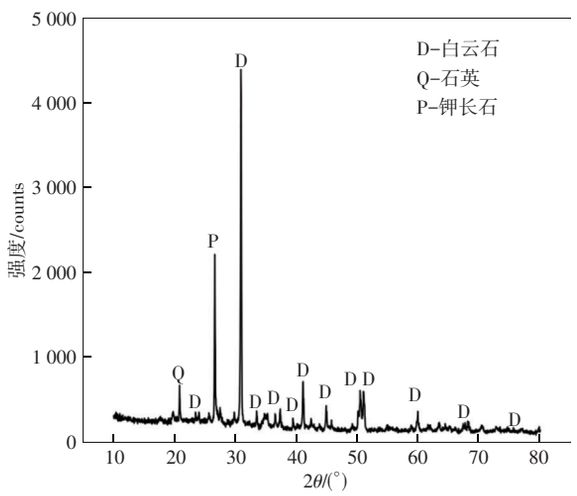


图 1　银钒矿试样 XRD 图谱

Fig. 1　XRD pattern of the silver-vanadium ore sample

2.2.2　试样矿物组成及含量

借助 AMICS 系统对全粒级样品进行矿物定量测定，结果见表 2。由表 2 可知，银钒矿试样中非金属矿物占绝对主体，以白云石、钾长石、含钒钾长石为主，其次为石英、黑云母、辉石，还含有少量磷灰石、方解石、高岭石等；其中含钒钾长石含量达到 17.07%。金属矿物占比仅 2.80%，主要为磁铁矿、赤铁矿；载银矿物含银黄铁矿含量极低，仅 0.07%。该特征表明，银的选别回收会因载体矿物含量过低而存在较大难度。

3　银、钒有价元素的赋存状态与嵌布特征

为了排除颗粒表面黏附对微量的银、钒元素分析造成的不利影响，将检测样品进一步筛分，取 −150+75 μm(−100+200 目)的粗粒水洗样品，用于银、钒元素的赋存状态分析。扫描电镜观测结果(图 2)表明，粗粒级样品矿物颗粒粒度相对均匀，表面黏附微细颗粒少，满足微区测试条件；同时可以观察到矿石颗粒表面粗糙，风化改造现象十分显著。对该粗粒水洗样品进行 BPMA 测试，矿物伪彩色图(图 3)显示样品以钾长石、石英为主要矿物，白云石占比有所下降，这与白云石硬度较低、粗粒级中不易保留的矿物学特性相吻合。

表 2　银钒矿试样矿物组成及相对含量

Table 2　Mineral composition and relative content of the silver vanadium ore sample　/%

矿物名称	含量	矿物名称	含量
磁铁矿	1.66	钙长石	0.45
赤铁矿	1.05	高岭石	0.29
含银黄铁矿	0.07	硅酸钙	0.24
黄铁矿	0.02	铁铝榴石	0.22
白云石	38.34	重晶石	0.18
钾长石	17.3	铁橄榄石	0.16
含钒钾长石	17.07	钠长石	0.11
石英	8.07	绿泥石	0.03
黑云母	4.54	石膏	0.03
普通辉石	3.95	三水铝石	0.01
透辉石	2.98	铝酸钙	0.01
磷灰石	0.61	硅酸钛	0.01
方解石	0.60	榍石	0.01

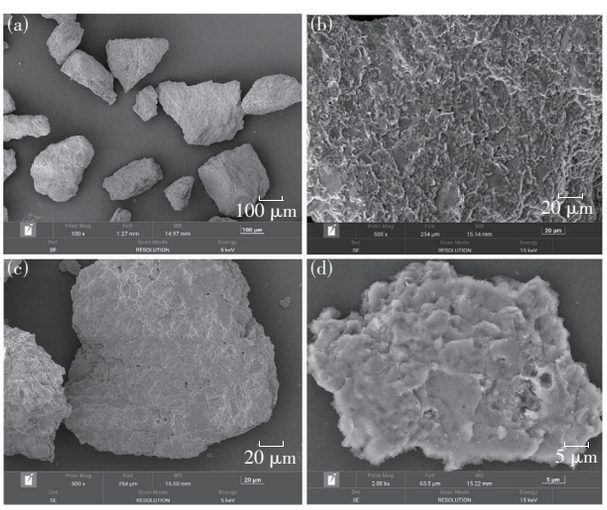


图 2　粗粒银钒矿扫描电镜分析

Fig. 2　Scanning electron microscopic analysis of the coarse silver-vanadium ore

对粗粒样品中钾长石进行 BPMA 与 SEM-EDS 高倍分析，分析结果见图 4、5。由图 4、5 可知，钾长石风化严重，多以颗粒集合体形式产出；钾长石颗粒

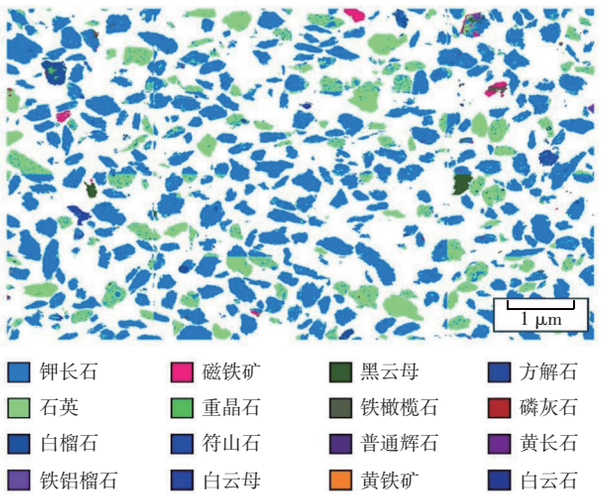


图 3 粗粒级银钒矿 BPMA 分析

Fig. 3 BPMA analysis of the coarse silver-vanadium ore

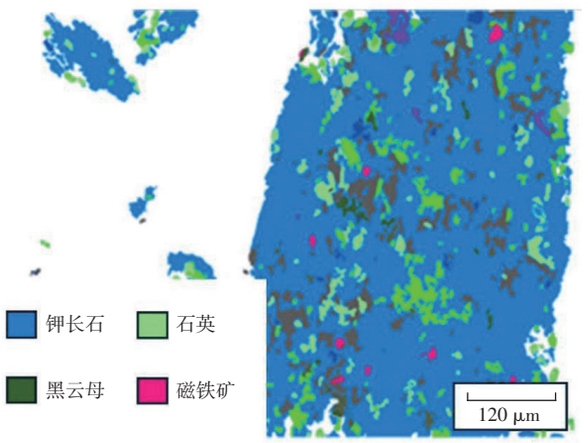


图 4 钾长石的嵌布特征(BPMA 分析)

Fig. 4 Embedment characteristics of potash feldspar (BPMA analysis)

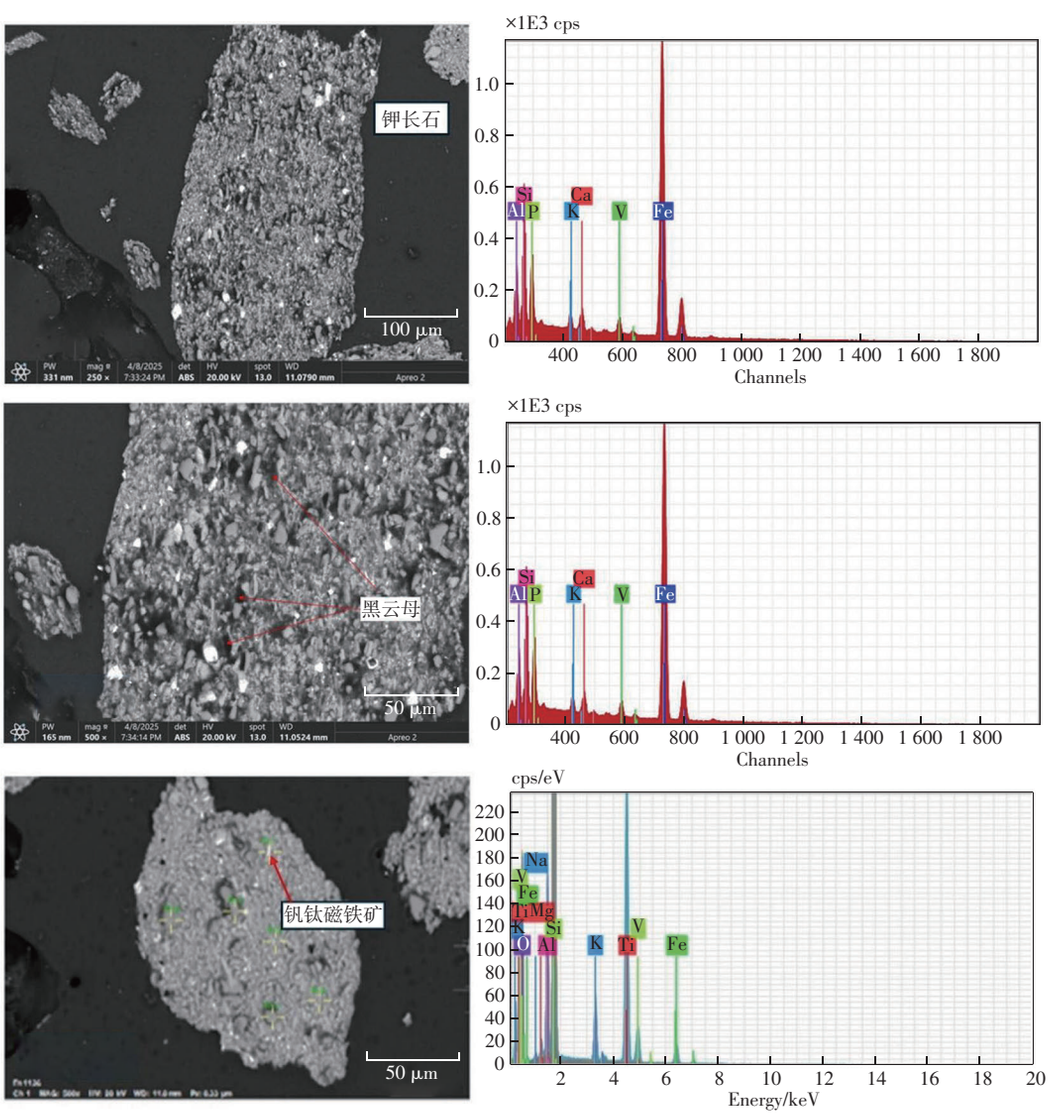


图 5 钾长石的嵌布特征(SEM-EDS 分析)

Fig. 5 Characteristics of potash feldspar dissemination (SEM-EDS analysis)

内部普遍包裹微米尺度的黑云母、石英以及磁铁矿颗粒。能谱检测证实，钾长石、黑云母以及包裹的磁铁矿颗粒中均检测出钒元素。

3.1　钒元素的赋存状态

3.1.1　含钒钾长石中主要化学元素面分布

钾长石的扫描电子显微镜-能谱仪(SEM-EDS)分析结果见图6。图6结果显示，钾长石的主要化学元素为O、Mg、Si、Al、K、Ti、V、Cr、Fe。

3.1.2　钒元素的赋存形式

银钒矿中钒元素的赋存状态具有显著复杂性。从矿物学角度来看，钒主要以类质同象的形式赋存于钾长石晶格中。此外，作为钒主要载体矿物的钾长石内部，还包裹有少量粒径小于10 μm的钒钛磁铁矿与黑云母微颗粒，钒元素也赋存在上述包裹体矿物内，由此形成多矿物聚集体。

1)钒以类质同象形式赋存于钾长石晶格中

钾长石的EDS分析结果(表3)表明，硅(Si)、铝(Al)、钾(K)为钾长石的主要组成元素，各测试点位均可以检出；钒(V)在各个测试点位均有检出。由此表明，钒元素以类质同象形式赋存在钾长石晶格中。

2)钒存在于黑云母中

黑云母的EDS分析结果(表4)表明，镁(Mg)、

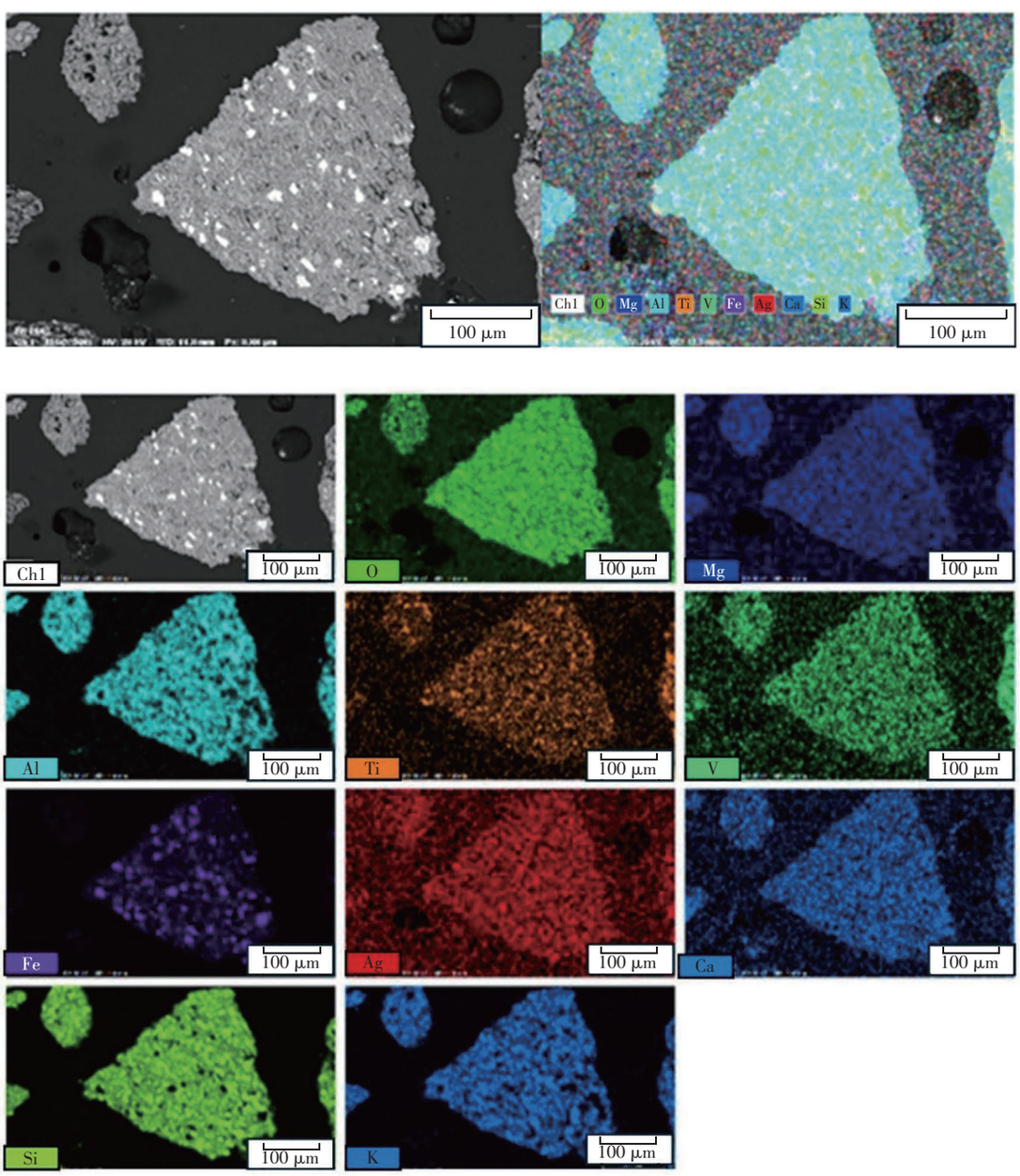


图6　钾长石中主要化学元素面分布情况

Fig. 6　Surface distribution of main chemical elements in potash feldspar

表3 钾长石化学成分EDS测定结果

Table 3 Chemical composition of potash feldspar determined by EDS /%

点位	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	V	Fe
1	3.92	12.67	29.05	9.55			5.26	6.32
2	3.42	12.66	28.62	9.08			5.49	7.38
3	1.17	8.59	41.53	5.71			1.71	1.03
4	3.40	12.93	29.53	9.32			6.86	1.24
5	1.33	15.66	27.30	10.24			1.17	2.18
6	2.78	11.46	33.25	8.14		1.21	2.45	2.40
7	2.54	16.90	31.05	10.82			1.66	2.30
8	2.87	15.99	35.76	11.81			3.12	2.70
9	2.50	13.29	34.50	9.43			2.98	1.96
10	2.17	14.83	34.10	9.75			1.87	1.83
11	2.56	16.61	31.01	10.05			1.67	2.08
12	0.85	17.85	28.72	8.05			1.34	1.72
13	3.04	12.33	32.60	8.92			7.61	1.30
14	2.39	12.05	33.07	7.32			3.19	1.96
15	2.50	12.87	32.06	8.83			3.00	2.99
16	0.82	9.63	36.74	7.51			1.34	0.99
17		9.91	32.67	8.25			3.09	2.76
平均值	2.25	13.31	32.44	8.99	0	1.21	3.16	2.54

表4 黑云母化学成分EDS测定结果

Table 4 Chemical composition of biotite determined by EDS /%

点位	O	Mg	Al	Si	K	V	Fe
1	11.77	1.50	15.00	47.08	14.43	1.10	9.12
2	7.39	1.48	16.77	45.17	15.38	1.15	12.66
3	6.23	1.31	19.50	47.80	18.16	0.37	6.63
4	8.63	0.53	6.99	69.08	8.06	0.35	6.36
5	7.99	0.80	9.17	63.84	8.05	0.72	9.44
6	5.54	0.57	14.90	48.40	19.46	0.61	10.51
7	5.61	2.80	18.17	44.72	14.88	2.47	11.34
8	7.70	4.31	17.76	45.73	16.04	1.96	6.05
9	7.42	1.01	13.01	59.96	10.92	0.67	7.01
10	6.08	2.08	15.02	44.63	14.23	1.56	16.40
11	7.17	2.27	14.12	44.59	18.84	1.62	11.75
平均值	7.41	1.70	14.58	51.00	14.37	1.14	9.79

铝(Al)、硅(Si)、钾(K)、铁(Fe)是构成黑云母的主要元素,各测试点位均检测出钒元素,证明钒元素同样赋存于黑云母矿物内。

3)钒存在于钒钛磁铁矿中

钾长石颗粒内部包裹有小于10 μm的黑云母、石英以及磁铁矿微细颗粒。SEM-EDS分析结果见图7,由图7可知,其中的微细粒磁铁矿含有钛(Ti)、铁(Fe)与钒(V),属于钒钛磁铁矿,钒元素赋存在该类包裹矿物之中。

3.2 银元素的赋存状态

3.2.1 含银黄铁矿中主要化学元素面分布

黄铁矿的扫描电子显微镜-能谱仪(SEM-EDS)分析结果见图8。图8结果显示,黄铁矿主要化学组成为Fe、S、Ag,铁元素在矿物内分布较为均匀,银元素分布相对分散,存在局部富集区域,硫元素也可见明显的富集区域。

3.2.2 银元素的赋存形式

SEM-EDS对黄铁矿含银区域的测试结果(图9)表明,矿物主要由铁、硫组成,含有少量银元素。银元素主要赋存在含银黄铁矿之中。镜下观察(图10)可见,部分含银黄铁矿被磁铁矿包裹,仅有少量含银黄铁矿呈单体解离形态。含银黄铁矿嵌布粒度整体较细,粒度多分布在75 μm以下,部分颗粒粒度甚至低于15 μm。含银黄铁矿主要与钾长石连生,其次与白云石、石英、磁铁矿等矿物连生。

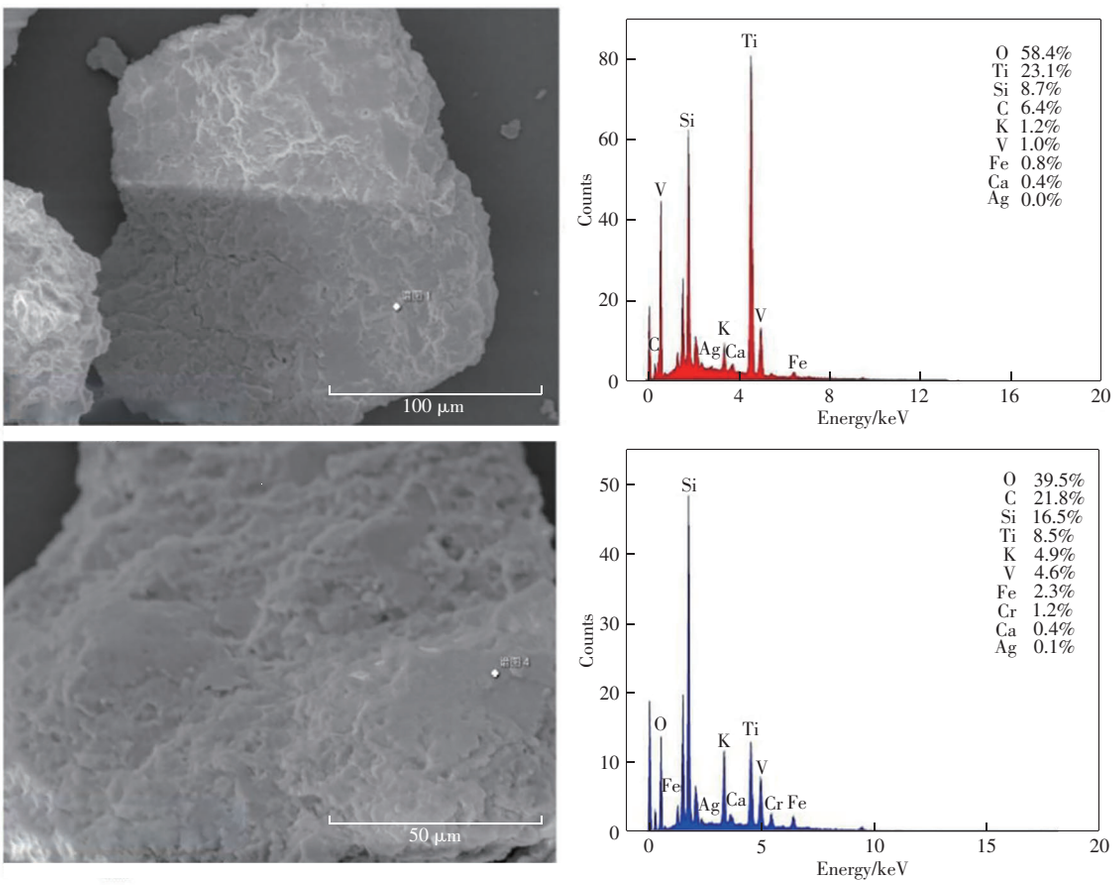


图 7　EDS 测定得出含有钒钛磁铁矿

Fig. 7　Vanadium-bearing titanomagnetite determined by EDS

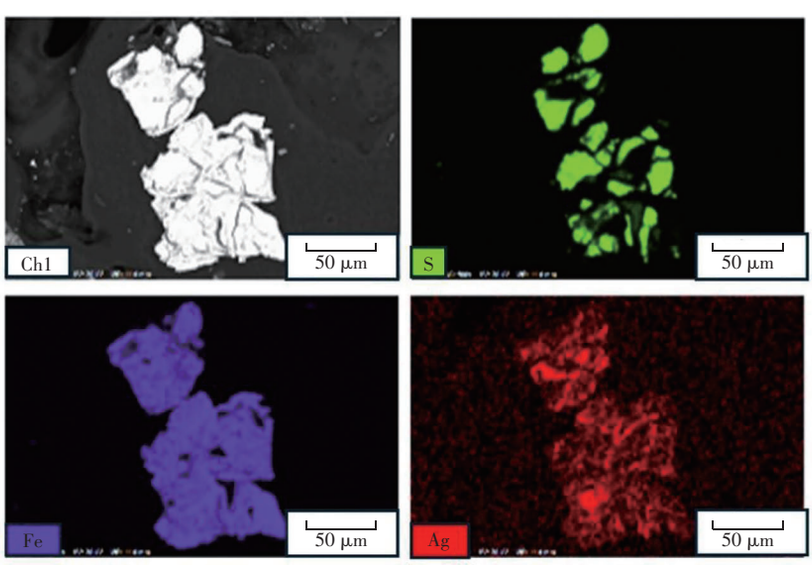


图 8　黄铁矿中主要化学元素面分布情况

Fig. 8　Surface distribution of main chemical elements in pyrite

4　主要矿物嵌布粒度与解离特征

4.1　含钒钾长石嵌布粒度

利用 AMICS 对全粒级样品开展含钒钾长石的粒度统计，结果见表 5。含钒钾长石嵌布粒度分布区间为 9.38～178.38 μm，粒度分布范围较宽；其中 31.53～89.19 μm 粒级占比最高，达到 61.28%，表现为中细粒嵌布特征。

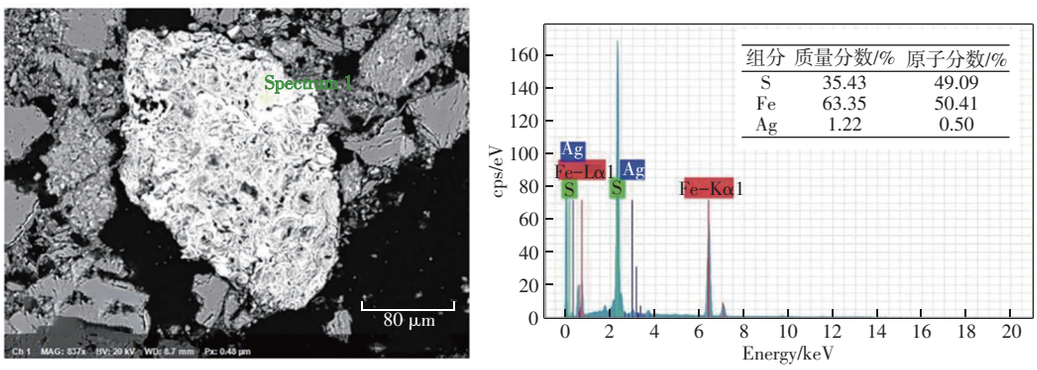
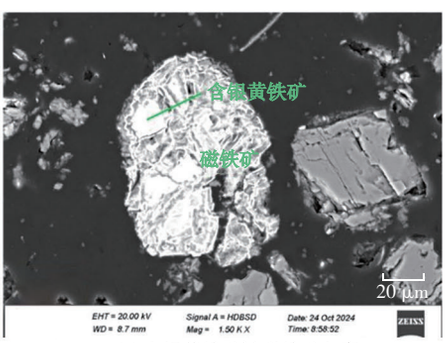
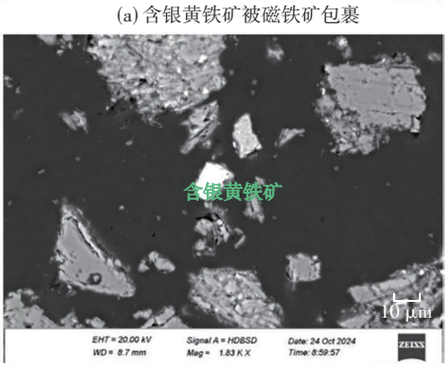


图9 EDS测定黄铁矿中主要化学成分

Fig. 9 Determination of main chemical components in pyrite by EDS



(a) 含银黄铁矿被磁铁矿包裹



(b) 单体解离态的含银黄铁矿

图10 含银黄铁矿中主要矿物间的嵌布特征

Fig. 10 Disseminated characteristics of main minerals in silver-bearing pyrite

4.2 含钒钾长石解离与连生关系

含钒钾长石在原矿中占比为17.07%，矿物单体解离度仅为1.30%，绝大部分以连生体形式存在。由表6结果可知，含钒钾长石与白云石连生占比最高，为25.21%；其次与磁铁矿、赤铁矿连生，占比分别为22.60%、14.85%，此外还与钾长石、石英、高岭石、黑云母等矿物存在不同程度连生。

从选矿工艺角度分析，极低的单体解离度说明：想要实现含钒钾长石有效富集，必须通过磨矿实现矿

表5 含钒钾长石嵌布粒度分布

Table 5 Grain-size distribution of vanadium-bearing potash feldspar

粒度/μm	保留颗粒占比/%	通过颗粒占比/%
212.13	0	100
178.38	2.38	97.62
150	3.47	94.15
126.13	3.74	90.4
106.07	3.58	86.82
89.19	8.04	78.78
75	7.19	71.59
63.07	10.36	61.23
53.03	10.32	50.91
44.6	7.87	43.04
37.5	8.71	34.33
31.53	8.79	25.54
26.52	5.4	20.14
22.3	5.24	14.9
18.75	4.07	10.83
15.77	3.43	7.4
13.26	2.97	4.43
11.15	2.70	1.73
9.38	1.62	0.11
7.88	0.06	0.05
6.63	0.02	0.04
5.57	0.01	0.02
4.69	0.01	0.02
3.94	0	0.01
3.31	0	0.01
2.79	0	0.01

表6 含钒钾长石与其他矿物的连生关系

Table 6 Intergrowth relationship between vanadium-bearing potassium feldspar and other minerals /%

矿物名称	单体含量	连生体含量							
		与白云石	与磁铁矿	与赤铁矿	与钾长石	与石英	与高岭石	与黑云母	与其他矿物
含钒钾长石	1.30	25.21	22.6	14.85	7.05	5.51	3.60	1.68	6.38

物解离；但该矿物集中分布于中细粒区间，过度磨矿容易引发过粉碎问题，会对后续分选造成不利影响。

5　影响有价金属回收的矿物学因素

该银钒矿的主要有价金属为钒与银。钒主要以类质同象形式赋存于钾长石晶格中，少量钒赋存于钾长石内部包裹的微米级钒钛磁铁矿、黑云母包裹体内，因此钒的富集应以选别其载体矿物钾长石为主；微量银元素主要赋存于含银黄铁矿中，可通过选别载体矿物黄铁矿实现银的富集。

白云石为本矿石中含量最高的脉石矿物，其占比超过38%，与钾长石矿物含量相当。白云石的存在会增加钒浸出阶段的酸耗，同时降低浸出液纯度与浸出效率，可通过一段磨矿—反浮选脱钙工艺去除白云石，完成钾长石的预富集。银的载体矿物含银黄铁矿嵌布粒度多在75 μm以下，部分颗粒粒度可低至15 μm，需要对脱钙所得精矿开展二段磨矿处理，再采用正浮选回收黄铁矿，实现银元素的富集。

综合上述矿物学特征，推荐采用一段磨矿反浮选脱钙—二段磨矿正浮选黄铁矿的阶段选别原则工艺流程，实现银钒矿中银、钒的综合回收。

6　结论

1）宜昌白果园银钒矿原矿V_2O_5含量为1.16%，Ag_2O含量为0.01%，属于低品位银钒矿石。矿石风化程度严重，矿物表面粗糙。矿石非金属矿物主要为白云石、钾长石、石英；金属矿物主要为磁铁矿、赤铁矿。

2）借助AMICS、BPMA、SEM-EDS、XRD等检测手段开展工艺矿物学研究表明，钒的主要载体矿物为钾长石，钒大多以类质同象形式赋存于钾长石晶格中；钾长石内部还包裹少量粒径小于10 μm的钒钛磁铁矿、黑云母微颗粒，包裹体中亦赋存部分钒。银元素主要赋存在含银黄铁矿中。

3）含钒钾长石嵌布粒度集中在31.53～89.19 μm，该粒级占比61.28%，主要与白云石、磁铁矿、赤铁矿、钾长石、石英等矿物连生。含银黄铁矿嵌布粒度较细，少量呈单体解离，多与白云石、钾长石、石英、磁铁矿连生。

4）根据矿石工艺矿物学特征，推荐采用一段磨矿反浮选脱钙—二段磨矿正浮选黄铁矿的阶段选别工艺流程，可实现银钒矿中银、钒元素的综合回收。

参考文献

[1] Wang Yanying, Zhang Hui, Hu Hao, et al. Selective heavy atom effect-promoted photosensitization colorimetric detection of Ag^+ in silver ore samples[J]. Analytical Chemistry, 2023, 95(16): 6501-6506.

[2] 潘昭帅，张照志，车东，等. 中国银矿资源特征及新能源背景下需求分析[J]. 中国地质，2024，51(5)：1554-1569.
Pan Zhaoshuai, Zhang Zhaozhi, Che Dong, et al. Characteristics and demand analysis of silver resources in China under the background of new energy[J]. Geology in China, 2024, 51(5): 1554-1569.

[3] 瞿金为，马娜，胡月芳，等. 钒资源现状与石煤钒矿提钒新工艺进展[J]. 矿产综合利用，2025，46(1)：194-199.
Qu Jinwei, Ma Na, Hu Yuefang, et al. Current situation of vanadium resources and new process progress of vanadium extraction from the stone coal vanadium ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(1): 194-199.

[4] 周卫宁. 中国主要伴(共)生银矿床银的赋存状态研究[J]. 矿产与地质，1994，8(4)：233-244.
Zhou Weining. Study on the occurrence of silver in the main associated silver deposits in China[J]. Mineral Resources and Geology, 1994, 8(4): 233-244.

[5] 卢家烂，庄汉平，傅家谟，等. 湖北兴山白果园黑色页岩型银钒矿床中银钒赋存状态研究[J]. 地球化学，1999，28(3)：222-230.
Lu Jialan, Zhuang Hanping, Fu Jiamo, et al. Occurrence of Ag and V of Baiguoyuan black shale hosted silver and vanadium deposit in Hubei Province, China[J]. Geochimica, 1999, 28(3): 222-230.

[6] 谭满堂，丁振举，姚书振，等. 鄂西白果园银钒矿床地球化学特征与成矿作用[J]. 地质科技情报，2013，32(2)：50-57.
Tan Mantang, Ding Zhenju, Yao Shuzhen, et al. Geochemical characteristics and mineralization of baiguoyuan Ag-V deposit in western Hubei Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2013, 32(2): 50-57.

[7] 陈开旭，杨振强，金光富，等. 湖北白果园银钒矿床中银的成岩富集机制探讨[J]. 矿床地质，1997，16(1)：53-60.
Chen Kaixu, Yang Zhenqiang, Jin Guangfu, et al. A preliminary discussion on silver enrichment mechanism in the diagenetic process of the Baiguoyuan silver vanadium deposit, Hubei Province[J]. Mineral Deposits, 1997, 16(1): 53-60.

[8] 李方会，杨刚忠，姚燕，等. 湖北省兴山县白果园银钒矿床基本特征及成矿模式[J]. 资源环境与工程，2014，28(3)：246-251，256.
Li Fanghui, Yang Gangzhong, Yao Yan, et al. Basic characteristics and metallogenic model of Baiguoyuan

silver-vanadium deposit in Xingshan County, Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(3): 246-251, 256.

[9] 李婕. 银钒矿选冶联合综合回收银钒的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(12): 42-46.
Li Jie. Study on recovery of silver and vanadium from silver-vanadium ore with mineral and metallurgy united process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2012(12): 42-46.

[10] 陈超, 谢发鹏. 白果园黑色页岩型银钒矿床[J]. 矿床地质, 1986, 5(1): 53-62.
Chen Chao, Xie Fapeng. An account of the baiguoyuan black shale type silver-vanadium deposit[J]. Mineral Deposits, 1986, 5(1): 53-62.

[11] 徐永新, 侯运炳, 杨欢. 黑色页岩型银钒矿综合回收银钒试验研究[J]. 矿冶工程, 2008, 28(1): 67-70.
Xu Yongxin, Hou Yunbing, Yang Huan. Experimental study on the overall recovering silver and vanadium from the black shale-hosted silver and vanadium deposits[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(1): 67-70.

[12] 朱丹, 桂博艺, 王芳, 等. AMICS测试技术在铌矿中的应用: 以竹溪铌矿为例[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(3): 1-7.
Zhu Dan, Gui Boyi, Wang Fang, et al. Application of the advanced mineral identification and characterization system (AMICS) in the Nb deposit: a case study of the Zhuxi Nb deposit[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(3): 1-7.

[13] 吴中贤, 陶东平. 云南某胶磷矿AMICS工艺矿物学研究及其难选机理探讨[J]. 工程科学学报, 2021, 43(4): 503-511.
Wu Zhongxian, Tao Dongping. Mineralogical analysis of collophane in Yunnan using AMICS and exploration of difficult flotation mechanisms[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(4): 503-511.

[14] 李向益, 杨社平, 乐智广, 等. 云南某高磷高铁锰矿工艺矿物学与选矿工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(12): 34-42.
Li Xiangyi, Yang Sheping, Le Zhiguang, et al. Research on process mineralogy and mineral processing of a high phosphorus and high iron manganese ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(12): 34-42.

[15] 孙晓华, 付强, 应永朋, 等. 青海某低品位铜铅锌银多金属矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(5): 5-10.
Sun Xiaohua, Fu Qiang, Ying Yongpeng, et al. Mineralogy of a low-grade copper-lead-zinc-silver polymetallic ore in Qinghai Province[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(5): 5-10.

[16] 刘飞燕, 徐力, 陈超, 等. 攀西某强蚀变钒钛磁铁矿钛的赋存状态及理论指标预测[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(6): 13-20, 39.
Liu Feiyan, Xu Li, Chen Chao, et al. Occurrence state of titanium in a strongly altered vanadium titanium magnetite from Panxi and prediction of theoretical indexes for titanium extraction[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(6): 13-20, 39.

[17] 王明燕, 李磊, 肖仪武. 内蒙古某银矿矿石特性及其对选矿的影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(4): 20-26, 32.
Wang Mingyan, Li Lei, Xiao Yiwu. Mineralogical properties of a silver ore in Inner Mongolia and its effects on mineral processing[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(4): 20-26, 32.

[18] 江云水. 现代海洋沉积物X射线衍射全矿物分析方法[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(34): 11-14.
Jiang Yunshui. Modern X-ray diffraction whole-mineral analysis method for marine sediments[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(34): 11-14.

[19] 温利刚, 曾普胜, 詹秀春, 等. 矿物表征自动定量分析系统(AMICS)技术在稀土稀有矿物鉴定中的应用[J]. 岩矿测试, 2018, 37(2): 121-129.
Wen Ligang, Zeng Pusheng, Zhan Xiuchun, et al. Application of the automated mineral identification and characterization system(AMICS) in the identification of rare earth and rare minerals[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(2): 121-129.

[20] 温利刚, 贾木欣, 王清, 等. 基于扫描电子显微镜的自动矿物学新技术: BPMA及其应用前景[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(2): 12-23.
Wen Ligang, Jia Muxin, Wang Qing, et al. A new SEM-based automated mineralogy system: BPMA and its application prospects in mining industry[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(2): 12-23.

(本文编辑 刘水红)